# การกักเก็บพลังงานเชิงกลด้วยเทคโนโลยีฟลายวีล

## (Mechanical Energy Storage Using Flywheel Technology)

**สำหรับนักศึกษา นักวิจัย วิศวกร และผู้สนใจด้านเทคโนโลยีระบบกักเก็บพลังงาน**

**โดย ผศ.อภิชิต เสมศรี**

**พิมพ์ครั้งที่ 1**

**ชื่อหนังสือ :** การกักเก็บพลังงานเชิงกลด้วยเทคโนโลยีฟลายวีล
(Mechanical Energy Storage Using Flywheel Technology)
**ชื่อผู้แต่ง :** ผศ.อภิชิต เสมศรี
**จัดทำโดย :** ผศ.อภิชิต เสมศรี
**พิมพ์ครั้งที่** : 1
**จัดจำหน่ายโดย** : ศูนย์หนังสือแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
สำหรับนักศึกษา นักวิจัย วิศวกร และผู้สนใจด้านเทคโนโลยีระบบกักเก็บพลังงาน

**สงวนสิทธ์ในประทศไทยตามพระราชบัญญัติ ลิขสิทธิ์ พ.ศ. 2537**
**ราคา 250 บาท**

ISBN(e-book) : 978-616-631-097-9

**ขอสงวนสิทธิ์ ห้ามไม่ให้ผู้ใดนำส่วนหนึ่งหรือทั้งหมดของหนังสือเล่มนี้ ทำการคัดลอกเพื่อนำไปแจกจ่ายต่อในเชิงพาณิชย์**

# คำนำ

หนังสือ **“การกักเก็บพลังงานเชิงกลด้วยเทคโนโลยีฟลายวีล (Mechanical Energy Storage Using Flywheel Technology)”** เล่มนี้ จัดทำขึ้นเพื่อเป็นตำราและเอกสารอ้างอิงทางวิชาการสำหรับนักศึกษา นักวิจัย วิศวกร และผู้สนใจด้านเทคโนโลยีระบบกักเก็บพลังงาน โดยมุ่งเน้นการอธิบายองค์ความรู้เชิงลึกตั้งแต่พื้นฐานทางทฤษฎีไปจนถึงการประยุกต์ใช้งานจริงในภาคอุตสาหกรรมและระบบพลังงานสมัยใหม่ โดยผู้แต่งได้มีการเรียบเรียงข้อมูลจากงานวิจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง

ในบริบทของการเปลี่ยนผ่านสู่ระบบพลังงานสะอาดและการเพิ่มสัดส่วนพลังงานหมุนเวียน เทคโนโลยีระบบกักเก็บพลังงานมีบทบาทสำคัญอย่างยิ่งต่อความมั่นคง เสถียรภาพและคุณภาพของระบบไฟฟ้า เทคโนโลยีฟลายวีลในฐานะระบบกักเก็บพลังงานเชิงกลที่มีประสิทธิภาพสูง ตอบสนองได้รวดเร็วและมีอายุการใช้งานยาวนาน จึงได้รับความสนใจเพิ่มขึ้นทั้งในงานวิจัยระดับสากลและการใช้งานเชิงพาณิชย์ หนังสือเล่มนี้จึงรวบรวมและเรียบเรียงองค์ความรู้ที่ทันสมัย พร้อมทั้งบูรณาการแนวคิดด้านวิศวกรรมไฟฟ้า เครื่องกล วัสดุศาสตร์ ระบบควบคุม และปัญญาประดิษฐ์เข้าไว้ด้วยกันอย่างเป็นระบบ เนื้อหาในหนังสือแบ่งออกเป็น 5 บทหลัก ได้แก่

บทที่ 1 เทคโนโลยีระบบกักเก็บพลังงานฟลายวีล (Flywheel Energy Storage System Technology) นำเสนอภาพรวมของเทคโนโลยี ระบบกักเก็บพลังงานประเภทต่าง ๆ โครงสร้าง องค์ประกอบ หลักการทำงาน ตัวแปลงพลังงานไฟฟ้า ตลอดจนการประยุกต์ใช้งานเทคโนโลยีของระบบกักเก็บพลังงานฟลายวีลและความสำเร็จ ความท้าทาย แนวโน้มในอนาคต

บทที่ 2 พื้นฐานทางฟิสิกส์ในระบบกักเก็บพลังงานฟลายวีล (Fundamental Physics of Flywheel Energy Storage Systems) อธิบายหลักการโมเมนตัมเชิงมุมฟลายวีล พลศาสตร์การหมุน จลนศาสตร์ พลังงานจลน์ โมเมนต์ความเฉื่อย ความเค้นในวัสดุและข้อจำกัดทางกายภาพที่เกี่ยวข้อง เพื่อวางรากฐานความเข้าใจเชิงลึกในระดับทฤษฎี

บทที่ 3 ปัญญาประดิษฐ์ของระบบกักเก็บพลังงานฟลายวีล (Artificial Intelligence for Flywheel Energy Storage Systems) กล่าวถึงการประยุกต์ใช้เทคนิคปัญญาประดิษฐ์ อัลกอริทึมการควบคุมขั้นสูงเชิงปัญญาประดิษฐ์ เทคนิคที่ใช้ปัญญาประดิษฐ์และการเรียนรู้ของเครื่องในงานควบคุม การพยากรณ์ การบริหารจัดการพลังงาน และการเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของระบบ

บทที่ 4 การเพิ่มสมรรถนะยานพาหนะด้วยระบบกักเก็บพลังงานฟลายวีล (Enhancing Vehicular Performance with Flywheel Energy Storage) นำเสนอระบบการกู้คืนพลังงาน อุปกรณ์จัดเก็บพลังงาน การประยุกต์ใช้งานระบบกักเก็บพลังงานฟลายวีล การประยุกต์ใช้ในระบบขับเคลื่อนยานยนต์ที่ใช้ระบบกักเก็บพลังงานฟลายวีล การพิจารณาองค์ประกอบสำคัญและข้อพิจารณาการออกแบบ

บทที่ 5 เทคโนโลยี การประยุกต์ใช้งาน และแนวโน้มในอนาคต (Technology, Applications, and Future Trends) วิเคราะห์ทิศทางการพัฒนาในระดับอุตสาหกรรม การพัฒนาเทคโนโลยีระบบกักเก็บพลังงานฟลายวีล คุณสมบัติของระบบกักเก็บพลังงานฟลายวีล แนวทางการควบคุม การเพิ่มเสถียรภาพและการบำรุงรักษาของระบบกักเก็บพลังงานฟลายวีล นวัตกรรมด้านวัสดุ ความเร็วรอบสูง ระบบตลับลูกปืนแม่เหล็ก ตลอดจนบทบาทของฟลายวีลในระบบพลังงานอัจฉริยะในอนาคต

ผู้เขียนหวังเป็นอย่างยิ่งว่าหนังสือเล่มนี้จะเป็นประโยชน์ต่อการศึกษา การสอน การวิจัย และการพัฒนาเทคโนโลยีด้านระบบกักเก็บพลังงานในประเทศไทยและระดับสากล อีกทั้งเป็นพื้นฐานสำคัญสำหรับการต่อยอดองค์ความรู้เชิงลึกในระดับบัณฑิตศึกษาและการวิจัยขั้นสูงต่อไป

ผศ.อภิชิต เสมศรี
สาขาวิชา เทคโนลียีวิศวกรรมอุตสาหการ
คณะเทคโนโลยีดิจิทัลและนวัตกรรม
มหาวิทยาลัยเซาธ์อีสท์บางกอก

# สารบัญ


หน้า

**บทที่ 1 เทคโนโลยีระบบกักเก็บพลังงานฟลายวีล (Flywheel Energy Storage System Technology)** 1

1.1 บทนำ (Introduction) 1

1.2 ระบบกักเก็บพลังงานประเภทต่าง ๆ (Types of Energy Storage Systems) 2

1.3 หลักการทำงานและองค์ประกอบระบบกักเก็บพลังงานฟลายวีล (Principle of Operation and Components of the Flywheel Energy Storage System) 5

1.4 ตัวแปลงพลังงานไฟฟ้า (Power Electronic Converter) 21

1.5 การประยุกต์ใช้งานระบบกักเก็บพลังงานฟลายวีล (Flywheel Energy Storage System Applications) 24

1.6 ระบบกักเก็บพลังงานฟลายวีลเชิงพาณิชย์ (Commercial Flywheel Energy Storage Systems) 29

1.7 ความสำเร็จ ความท้าทาย แนวโน้มในอนาคต (Achievements, Challenges, Future Trends) 31

1.8 กรณีศึกษา (Case Studies) 37

1.9 บทสรุป (Conclusion) 40

แบบฝึกหัด 43

บรรณานุกรม 50

**บทที่ 2 พื้นฐานทางฟิสิกส์ในระบบกักเก็บพลังงานฟลายวีล (Fundamental Physics of Flywheel Energy Storage Systems)** 65

2.1 บทนำ (Introduction) 65

2.2 โมเมนตัมเชิงมุมฟลายวีล (Flywheel Angular Momentum) 66

2.3 จลนศาสตร์ (Kinematics) 71

2.4 การเปรียบเทียบการออกแบบฟลายวีลการดัดงอแบบดัมเบล กับฟลายวีลมาตรฐาน (Comparison of Dumbbell Flexure Flywheel Design and Standard Flywheel) 75

# สารบัญ (ต่อ)


หน้า

2.5 อิทธิพลของรูปร่างวัตถุแข็งทรงกระบอก (Influence of the Shape of a Cylindrical Rigid Body) 80

2.6 การเปรียบเทียบกลไกการพลิกตัวของแมวที่กำลังตก (Comparison with the Righting Mechanism of a Falling Cat) 84

2.7 กรณีศึกษาตัวอย่างต้นแบบสาธิตฟลายวีล (Case Study of a Flywheel Prototype Demonstration) 86

2.8 พลังงานจลน์การหมุนสำหรับฟลายวีลขอบหนาและดิสก์ทรงกรวย (Rotational Kinetic Energy of Thick Rim and Conical Disc Flywheels) 91

2.9 กรณีศึกษา การออกแบบการทดลองโรเตอร์ฟลายวีลสำหรับระบบกักเก็บพลังงานด้วยฟลายวีลเพื่อการใช้งานในที่อยู่อาศัย (Case Study: Experimental Design of Flywheel Rotor with a Flywheel Energy Storage System for Residential Uses) 98

แบบฝึกหัด 140

บรรณานุกรม 147

**บทที่ 3 ปัญญาประดิษฐ์ของระบบกักเก็บพลังงานฟลายวีล** 153

**(Artificial Intelligence for Flywheel Energy Storage Systems)**

3.1 บทนำ (Introduction) 153

3.2 ปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence) 155

3.3 อัลกอริทึมการควบคุมขั้นสูงเชิงปัญญาประดิษฐ์ (Intelligent Advanced Control Algorithm: IACA) 172

3.4 เทคนิคที่ใช้ปัญญาประดิษฐ์ (AI-based Techniques) 178

3.5 สรุปการใช้ปัญญาประดิษฐ์ (Summary of Artificial Intelligence Applications) 185

แบบฝึกหัด 193

บรรณานุกรม 201

# สารบัญ (ต่อ)


หน้า

**บทที่ 4 การเพิ่มสมรรถนะยานพาหนะด้วยระบบกักเก็บพลังงานฟลายวีล (Enhancing Vehicular Performance with Flywheel Energy Storage)** 216

4.1 บทนำ (Introduction) 216

4.2 ระบบการกู้คืนพลังงาน (Energy Recovery Systems) 218

4.3 อุปกรณ์จัดเก็บพลังงาน (Storage Devices) 221

4.4 การประยุกต์ใช้งานปัจจุบันของระบบกักเก็บพลังงานฟลายวีล (Current applications of FESS) 230

4.5 ระบบขับเคลื่อนยานยนต์ที่ใช้ระบบกักเก็บพลังงานฟลายวีล (FESS-based Powertrain for Vehicles) 236

4.6 องค์ประกอบสำคัญและข้อพิจารณาการออกแบบ (Key Components and Design Considerations) 242

4.7 ความท้าทายและข้อจำกัดของระบบกักเก็บพลังงานฟลายวีล (Challenges and Limitations of FESS) 264

4.8 การเพิ่มประสิทธิภาพเพื่อลดการสูญเสียพลังงานขณะสแตนด์บายของระบบกักเก็บพลังงานฟลายวีล (Optimization of FESS standby losses) 275

4.9 แนวโน้มในอนาคต (Future trends) 283

4.10 บทสรุป (Conclusion) 286

แบบฝึกหัด 288

บรรณานุกรม 294

**บทที่ 5 เทคโนโลยี การประยุกต์ใช้งาน และแนวโน้มในอนาคต (Technology, Applications, and Future Trends)** 316

5.1 บทนำ (Introduction) 316

5.2 ศักยภาพและการประยุกต์ใช้งานระบบกักเก็บพลังงานฟลายวีล (Potential and Applications of Flywheel Energy Storage Systems) 317

5.3 เทคโนโลยีการกักเก็บพลังงานฟลายวีล (Flywheel Energy Storage Technology) 321

# สารบัญ (ต่อ)


| | หน้า |
|---|---|
| 5.4 การพัฒนาเทคโนโลยีระบบกักเก็บพลังงานฟลายวีล (Development of Flywheel Energy Storage System Technology) | 325 |
| 5.5 โครงสร้างและส่วนประกอบที่เกี่ยวข้องของระบบกักเก็บพลังงานฟลายวีล (Structure and Associated Components of a Flywheel Energy Storage System) | 327 |
| 5.6 คุณสมบัติระบบกักเก็บพลังงานฟลายวีล (Properties of Flywheel Energy Storage Systems) | 333 |
| 5.7 การประยุกต์ใช้ระบบกักเก็บพลังงานฟลายวีล (Applications of Flywheel Energy Storage Systems) | 334 |
| 5.8 แนวทางการควบคุม การเพิ่มเสถียรภาพ และการบำรุงรักษาของระบบกักเก็บพลังงานฟลายวีล (Control Approaches, Stability Improvement Techniques, and Maintenance Practices for Flywheel Energy Storage Systems) | 343 |
| 5.9 แนวโน้มในอนาคต (Future Trends) | 350 |
| 5.10 บทสรุป (Conclusion) | 353 |
| แบบฝึกหัด | 355 |
| บรรณานุกรม | 363 |
| **ดัชนี** | 377 |
| **ประวัติผู้แต่ง** | 388 |

# สารบัญตาราง

**ตารางที่** **หน้า**


1-1 การเปรียบเทียบวิธีการกักเก็บพลังงานหลักและคุณลักษณะสำคัญ 3
1-2 การเปรียบเทียบสมรรถนะมอเตอร์ทั้งสามประเภท 9
1-3 คุณลักษณะตลับลูกปืนแม่เหล็กแบบเดี่ยวทั้งสามประเภท 19
1-4 สรุประบบกักเก็บพลังงานฟลายวีลเชิงพาณิชย์ 29
1-5 การประยุกต์ใช้งานและข้อได้เปรียบ การใช้ระบบกักเก็บพลังงานฟลายวีล 30
1-6 สรุป ความสำเร็จและความท้าทายระบบกักเก็บพลังงานฟลายวีล 32
2-1 โมเมนต์ความเฉื่อยหลักของชิ้นส่วนที่เคลื่อนที่ได้ของต้นแบบสาธิต 89
2-2 การเปลี่ยนแปลงความเร็วเชิงมุมของโรเตอร์และเฟรม พร้อมอัตราส่วนความเร็วที่สอดคล้องกันสำหรับช่วงการเร่งและช่วงการเบรกของโรเตอร์ 90
2-3 ค่าปัจจัยรูปร่าง $K$ สำหรับรูปทรงที่มีความเค้นระนาบแตกต่างกัน 96
2-4 ข้อมูลลักษณะเฉพาะของวัสดุที่ใช้ทั่วไปสำหรับโรเตอร์ 97
2-5 ค่าพารามิเตอร์การออกแบบ 107
2-6 ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการคำนวณของฟลายวีล 110
2-7 คุณสมบัติเชิงกลของวัสดุ 114
2-8 การเปรียบเทียบผลจากการจำลองระหว่างฟลายวีลดิสก์ทรงกรวยกับฟลายวีลขอบหนา 122
2-9 ข้อมูลจำเพาะของอุปกรณ์ทดสอบ 125
2-10 ผลการทดลองเปรียบเทียบระหว่างเวลาในการกักเก็บพลังงาน ความเร็วของฟลายวีลและแรงเคลื่อนไฟฟ้าของฟลายวีลขอบหนา 126
2-11 ผลการทดลองเปรียบเทียบเวลาในการกักเก็บพลังงาน ความเร็วของฟลายวีลและแรงเคลื่อนไฟฟ้าของฟลายวีลดิสก์ทรงกรวย 128
2-12 ผลการทดลองเปรียบเทียบระหว่างฟลายวีลขอบหนาและฟลายวีลดิสก์ทรงกรวย 130
2-13 การเปรียบเทียบผลการทดลองของพลังงานจลน์ ความเร็วเชิงมุมและความเร็วการหมุนของฟลายวีลระหว่างฟลายวีลขอบหนาและฟลายวีลดิสก์กรวย 135
2-14 การเปรียบเทียบการวิเคราะห์ต้นทุน 138

# สารบัญตาราง (ต่อ)

**ตารางที่** **หน้า**


3-1 การเปรียบเทียบระหว่างตัวควบคุมชนิดต่าง ๆ ในระบบกักเก็บพลังงานฟลายวีล 174
3-2 อัลกอริทึมปรับจูนเชิงเมตาเฮียวริสติก สำหรับการยกระดับคุณภาพกำลังไฟฟ้าในระบบไฟฟ้า 187
3-3 การเปรียบเทียบซอฟต์แวร์ต่าง ๆ สำหรับการหาขนาดที่เหมาะสมที่สุดของระบบกักเก็บพลังงาน 189
3-4 ภาพรวมความพยายามในการกำหนดขนาดที่เหมาะสมที่สุดของระบบพลังงานหมุนเวียนและระบบกักเก็บพลังงาน 190
4-1 ลักษณะทางเทคนิคและเศรษฐศาสตร์ของเทคโนโลยีการกักเก็บพลังงานต่าง ๆ 223
4-2 การเปรียบเทียบระหว่างระบบไฮบริดไฟฟ้าและระบบไฮบริดที่ใช้ฟลายวีลเป็นตัวกักเก็บพลังงาน Flybrid 227
4-3 การเปรียบเทียบระหว่างแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนและระบบฟลายวีลสำหรับการประยุกต์ใช้ในยานยนต์ 228
4-4 ระบบฟลายวีลเชิงพาณิชย์ที่แตกต่างกัน 232
4-5 การเปรียบเทียบตลับลูกปืนที่เหมาะสมสำหรับระบบกักเก็บพลังงานฟลายวีล 244
4-6 การเปรียบเทียบระบบควบคุมการกักเก็บพลังงานฟลายวีลชนิดต่าง ๆ 247
4-7 การเปรียบเทียบเครื่องจักรไฟฟ้าที่ใช้ร่วมกับระบบกักเก็บพลังงานฟลายวีล 255
4-8 ลักษณะเฉพาะของวัสดุโรเตอร์ฟลายวีลชนิดต่าง ๆ 259
4-9 โหมดความล้มเหลวของฟลายวีล สาเหตุและผลลัพธ์ที่เกิดขึ้น 266
4-10 ทิศทางการวางของฟลายวีลและทิศทางแรงบิดปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น 270
5-1 การศึกษาเปรียบเทียบระบบกักเก็บพลังงานประเภทต่าง ๆ 319
5-2 การเปรียบเทียบระหว่างระบบจัดเก็บพลังงานกลหลายประเภท 322
5-3 คุณสมบัติของวัสดุฟลายวีลในแต่ละชนิด 330
5-4 การศึกษาเปรียบเทียบกลยุทธ์การควบคุมระบบกักเก็บพลังงานแบบต่าง ๆ โดยเน้นข้อดีและข้อจำกัด 347

# สารบัญรูป

**รูปที่** **หน้า**


1-1 การเติบโตของการผลิตพลังงานลมและพลังงานแสงอาทิตย์ในทศวรรษที่ผ่านมา 2

1-2 กำลังการผลิตที่ติดตั้งของพลังงานลมและพลังงานแสงอาทิตย์ 2
(a) กำลังการผลิตของพลังงานลม (b) กำลังการผลิตของพลังงานแสงอาทิตย์

1-3 โครงสร้างระบบกักเก็บพลังงานฟลายวีล 7

1-4 โครงสร้างของ (a) มอเตอร์เหนี่ยวนำโฮโมโพลาร์ และ (b) มอเตอร์เหนี่ยวนำแบบโรเตอร์คู่ 11

1-5 โครงสร้างมอเตอร์เหนี่ยวนำฟลักซ์แกน (a) แบบด้านเดียว และ (b) แบบสองด้าน 11

1-6 โครงสร้างมอเตอร์แม่เหล็กถาวรฟลักซ์แกน (a) มุมมองแยกชิ้นส่วน 13
และ (b) มุมมองด้านข้าง

1-7 โครงสร้าง (a) มอเตอร์ซิงโครนัสแม่เหล็กถาวร (b) มอเตอร์ซิงโครนัสแม่เหล็กถาวร 14
ไร้ตลับลูกปืน

1-8 โครงสร้าง (a) มอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ และ (b) มอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านแม่เหล็ก 14

1-9 โครงสร้างตลับลูกปืน (a) ตลับลูกปืนแม่เหล็กถาวร (b) ตลับลูกปืนแม่เหล็กแอกทีฟ 17
(c) ตลับลูกปืนแม่เหล็กตัวนำยิ่งยวด

1-10 โครงสร้างระบบตัวแปลงสองทิศทางสำหรับระบบกักเก็บพลังงานฟลายวีล 22

1-11 ตัวแปลงสองทิศทาง: (a) โทโพโลยี BTB (back-to-back) (b) การกำหนดค่า BTB (back-to-back) พร้อมวงจรเพิ่มแรงดัน เชื่อมต่อกับสัญญาณกระแสตรง (c) BTB (back-to-back) ร่วมกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลม (d) DC-DC ร่วมกับคอนเวอร์เตอร์แบบหนีบจุดนิวทรัล (Neutral Point Clamped Converter) (e) รูปแบบการต่อวงจรหรือโครงสร้างระบบคอนเวอร์เตอร์แบบ NPC 22

1-12 แผนผังระบบชาร์จรถยนต์ไฟฟ้าที่ใช้พลังงานจากโซลาร์เซลล์และระบบกักเก็บพลังงานฟลายวีล 38

1-13 ต้นทุนการลงทุนระบบไฮบริดที่ใช้ฟลายวีลร่วมกับโซลาร์เซลล์และระบบไฮบริดที่ใช้แบตเตอรี่ร่วมกับระบบโซลาร์เซลล์ ในสามพื้นที่ 38

1-14 การเปรียบเทียบต้นทุนการดำเนินงานตลอดอายุการใช้งาน 39

1-15 กระแสเงินสดสะสมตลอดอายุการใช้งานของระบบใน (a) เมืองเบรสต์ (Brest) 39
(b) เมืองเบงเกอรีร์ (Benguerir) และ(c) เมืองราบัต (Rabat)

# สารบัญรูป (ต่อ)

**รูปที่** **หน้า**


2-1 วัตถุเฉื่อยที่ถูกพิจารณาซึ่งประกอบด้วย: วัตถุเฉื่อยทรงกลม (ซ้าย), วัตถุเฉื่อยทรงกระบอก (กลาง) และดัมเบล (ขวา) โดยดัมเบลนี้มีมวลรวมอยู่เฉพาะที่วัตถุทรงกลมสองด้าน ซึ่งทำให้ดัมเบลสามารถทำหน้าที่เสมือนเป็นวัตถุเฉื่อยทรงกระบอกได้ ศูนย์กลางมวลของแต่ละวัตถุถูกแสดงไว้ และสมมติว่าแกนหลักของโมเมนต์ความเฉื่อยสอดคล้องกับแกน *x, y,* และ *z* ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าทรงกระบอกและดัมเบลมีค่าเทนเซอร์โมเมนต์ความเฉื่อยเหมือนกัน 67

2-2 การหมุนต่อเนื่องโดยใช้มุมออยเลอร์ $\varphi$, $\theta$ และ $\psi$ ซึ่งกำหนดเป็นลำดับตามลักษณะดังนี้ มุม $\varphi$ เป็นการหมุนรอบแกน *i*, มุม $\theta$ เป็นการหมุนรอบแกน *n* และมุม $\psi$ เป็นการหมุนรอบแกน *v* โดยลำดับการหมุนเริ่มจาก $\nu$ 68

2-3 ลำดับขั้นของการออกแบบฟลายวีล สามารถสังเกตได้ว่าในแต่ละขั้นตอน โมเมนตัมเชิงมุมของวัตถุ $L_1$ และ $L_2$ จะเอียงทำมุมกัน และรวมกันเป็นโมเมนตัมเชิงมุมรวม $L_{tot}$ ควรสังเกตว่า $\omega_1$ กับ $L_1$ และ $\omega_2$ กับ $L_2$ จะอยู่ในระนาบแนวตั้งเดียวกัน แต่จะมีทิศทางเชิงเส้นตรงเดียวกัน เฉพาะในกรณีที่โมเมนต์ความเฉื่อยของระบบเป็นลักษณะทรงกลมเท่านั้น 69

2-4 ร่างแข็งหมายเลข 1 ถูกแยกออกจากกลไกส่วนอื่น โดยแรงภายใน *T* และ $T'$ ถูกกระทำที่จุดข้อต่อแบบลูกบอล และข้อต่อความเร็วคงที่ ตามลำดับ โมเมนต์บิดสุทธิ $M_1$ ซึ่งมีค่าเท่ากับ $L_1$ (อนุพันธ์ตามเวลาของโมเมนตัมเชิงมุม $L_1$) ก็ถูกเน้นให้เห็นเช่นกัน 75

2-5 ฟลายวีลมาตรฐานและฟลายวีลชนิดยืดหยุ่น ที่ใช้สำหรับการเปรียบเทียบสมรรถนะ เส้นผ่านศูนย์กลาง *D* ของฟลายวีลมาตรฐานถูกกำหนดให้มีค่าพอดีกับความยาวของดัมเบลล์ (กล่าวคือ ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของมวลทรงกลม) ขอบเขตทรงกระบอกของฟลายวีลชนิดยืดหยุ่นถูกเน้นให้เห็นอย่างชัดเจน โดยขอบเขตนี้ครอบคลุมทั้งกลไก รวมถึงทรงกลมของดัมเบลล์ทั้งหมดด้วย 77

2-6 อัตราส่วนโมเมนตัมเชิงมุม $\eta_L$ เป็นฟังก์ชันของเส้นผ่านศูนย์กลางฟลายวีล *D* ภาพประกอบของฟลายวีลและดัมเบลล์แสดงรูปลักษณ์โดยรวมสำหรับค่าของเส้นผ่านศูนย์กลาง *D* ที่แตกต่างกัน 78

# สารบัญรูป (ต่อ)

**รูปที่** **หน้า**


2-7 อัตราส่วนพลังงานจลน์ $\eta_K$ เป็นฟังก์ชันของเส้นผ่านศูนย์กลางฟลายวีล *D* ภาพประกอบของฟลายวีลและดัมเบลล์แสดงรูปลักษณ์โดยรวมสำหรับค่าของเส้นผ่านศูนย์กลาง *D* ที่แตกต่างกัน 78

2-8 อัตราส่วนปริมาตร $\eta_V$ เป็นฟังก์ชันของเส้นผ่านศูนย์กลางฟลายวีล *D* ภาพประกอบของฟลายวีลและดัมเบลล์แสดงรูปลักษณ์โดยรวมสำหรับค่าของเส้นผ่านศูนย์กลาง *D* ที่แตกต่างกัน 79

2-9 ร่างเฉื่อยทรงกระบอกแบบหมุนรอบแกน ที่ใช้ในการศึกษา เช่นเดียวกับก่อนหน้านี้ ร่างแข็งทรงกระบอกถูกยึดกับฐานผ่านข้อต่อความเร็วคงที่และเชื่อมต่อเข้าหากันด้วยข้อต่อลูกบอล 81

2-10 ค่าความเฉื่อยสมมูล $J_{equ,L}$ เป็นฟังก์ชันของตัวประกอบรูปร่าง $\lambda$ ภาพประกอบของร่างเฉื่อยทรงกระบอกแสดงรูปลักษณ์โดยรวมของระบบสำหรับค่าตัวประกอบรูปร่าง $\lambda$ ที่แตกต่างกัน 82

2-11 ค่าความเฉื่อยสมมูล $J_{equ,K}$ เป็นฟังก์ชันของตัวประกอบรูปร่าง $\lambda$ ภาพประกอบของร่างแข็งทรงกระบอกแสดงรูปลักษณ์โดยรวมของระบบสำหรับค่าตัวประกอบรูปร่าง $\lambda$ ที่แตกต่างกัน (ไม่เป็นไปตามสัดส่วนจริง) 83

2-12 อัตราส่วน $J_{equ,K}$ / $J_{equ,L}$เป็นฟังก์ชันของตัวประกอบรูปร่าง $\lambda$ ภาพประกอบของร่างแข็งทรงกระบอกแสดงรูปลักษณ์โดยรวมของระบบสำหรับค่าตัวประกอบรูปร่าง $\lambda$ ที่แตกต่างกัน 83

2-13 การตกลงมาของแมวถูกมองในเชิงเปรียบเทียบว่าเป็นกระบอกสองอันที่หมุนกลิ้งอยู่ ในกรอบอ้างอิงที่กระบอกทั้งสองหมุนรอบแกนของตนเอง จะมีโมเมนตัมเชิงมุม $L_1'$ และ $L_2'$ แต่เมื่อพิจารณาในกรอบอ้างอิงที่ตรึงกับส่วนเอวของแมว กระบอกเหล่านี้จะมีการหมุนแกว่ง และมีโมเมนตัมเชิงมุม $L_1$ และ $L_2$ ซึ่งรวมกันเป็นโมเมนตัมเชิงมุมรวม $L_{tot}$ 85

2-14 มุมมอง CAD ของชิ้นต้นแบบที่มีการใช้งานจริง ได้แก่ *(a)* ข้อต่อความเร็วคงที่แบบยืดหยุ่น ซึ่งทำให้ส่วนบนสามารถหมุนแกว่งรอบแกน *x* และ *y* ได้ และ *(b)* ข้อต่อลูกบอล ซึ่งเชื่อมต่อร่างเฉื่อยที่หมุนแกว่งทั้งสองเข้าไว้ด้วยกัน หมายเหตุ: แท่งทั้งสองที่ขนานกับระนาบ *xy* อยู่ในระนาบต่างกันสองระนาบ โดยถูกแยกออกจากกันด้วยระยะ *d* 86

# สารบัญรูป (ต่อ)

**รูปที่** **หน้า**


2-15 ต้นแบบสาธิตที่ถูกสร้างขึ้น โดยมีการเน้นส่วนประกอบและข้อต่อชนิดต่าง ๆ ให้เห็นอย่างชัดเจน 88

2-16 การจัดวางระบบการวัด โดยมีการเน้นส่วนประกอบต่าง ๆ ให้เห็นอย่างชัดเจน 88

2-17 ความเร็วเชิงมุมของโรเตอร์ $(\varphi)$ และกรอบโครง $(\alpha)$ เมื่อเปรียบเทียบกับเวลา โดยสามารถระบุช่วงการเคลื่อนที่ได้ดังนี้: ช่วงเร่งความเร็วของโรเตอร์ (สีเขียว), ช่วงความเร็วคงที่ (สีน้ำเงิน), และช่วงเบรก (สีแดง) การเปลี่ยนแปลงของความเร็วเชิงมุม $\varphi$ และ $\alpha$ ถูกเน้นให้เห็นชัดเจนสำหรับช่วงเร่งความเร็วแรก 89

2-18 รูปแบบพื้นฐานของระบบกักเก็บพลังงานฟลายวีล 93

2-19 ทรงกระบอกกลมกลวง 94

2-20 ความเค้นในแนวรัศมี (Radial stress) และความเค้นในแนววงแหวน (Hoop stress) ในทรงกระบอกกลวงขนาดสั้นที่หมุนรอบแกนของตัวเองด้วยความเร็วเชิงมุม $\omega$ 96

2-21 ฟลายวีลขอบหนา 99

2-22 ฟลายวีลดิสก์ทรงกรวย 101

2-23 รูปทรงฟลายวีล โปรไฟล์ที่ 1 101

2-24 รูปทรงฟลายวีล โปรไฟล์ที่ 2 102

2-25 การออกแบบเพลารองรับฟลายวีล 116

2-26 รูปทรงฟลายวีล (ก) ฟลายวีลดิสก์ทรงกรวย และ(ข) ฟลายวีลขอบหนา 117

2-27 ไฟไนต์เอลิเมนต์เมสของฟลายวีลดิสก์ทรงกรวย 119

2-28 ไฟไนต์เอลิเมนต์เมสของฟลายวีลขอบหนา 119

2-29 ความเค้นฟลายวีลดิสก์ทรงกรวย ทดสอบที่ความเร็ว 1,500 รอบต่อนาที 120

2-30 ความเค้นฟลายวีลขอบหนาทดสอบที่ความเร็ว 1,500 รอบต่อนาที 120

2-31 ระยะการบิดงอฟลายวีลดิสก์ทรงกรวยทดสอบที่ความเร็วความเร็ว 1,500 รอบต่อนาที 120

2-32 ระยะการบิดงอฟลายวีลขอบหนาทดสอบที่ความเร็ว 1,500 รอบต่อนาที 121

2-33 ค่าความปลอดภัยฟลายวีลดิสก์ทรงกรวยทดสอบที่ความเร็ว 1,500 รอบต่อนาที 121

2-34 ค่าความปลอดภัยฟลายวีลขอบหนาทดสอบที่ความเร็ว 1,500 รอบต่อนาที 121

# สารบัญรูป (ต่อ)

**รูปที่** **หน้า**


2-35 โมเดลการออกแบบการทดลอง 123

2-36 การจัดเตรียมอุปกรณ์ทดลองฟลายวีลสำหรับการทดสอบโดยไม่ติดโหลด (a) การทดสอบฟลายวีลขอบหนา แสดงการติดตั้งฟลายวีลบนเพลาและเชื่อมต่อกับมอเตอร์สำหรับการหมุนทดสอบ (b) การทดสอบฟลายวีลดิสก์ทรงกรวย แสดงการติดตั้งฟลายวีลรูปทรงกรวยบนเพลาและเชื่อมต่อกับมอเตอร์ 124

2-37 การเปรียบเทียบระหว่างฟลายวีลขอบหนาและฟลายวีลดิสก์ทรงกรวยในด้านระยะเวลาการเก็บพลังงานและความเร็วรอบของฟลายวีล 132

2-38 การเปรียบเทียบระยะเวลาการเก็บพลังงานของฟลายวีลสองประเภทกับแรงดันไฟฟ้าที่ผลิตได้จากการหมุนของฟลายวีล 133

2-39 การเปรียบเทียบความเร็วของฟลายวีลกับแรงดันไฟฟ้าระหว่างฟลายวีลขอบหนาและฟลายวีลดิสก์ทรงกรวย 134

2-40 การเปรียบเทียบพลังงานระหว่างฟลายวีลขอบหนาและฟลายวีลดิสก์ทรงกรวย 136

3-1 โมเดล Machine Learning สำหรับการวิเคราะห์ความเสี่ยงด้านความปลอดภัยในระบบกักเก็บพลังงานฟลายวีลผสานกับแบตเตอรี่ 157

3-2 กระบวนการวิเคราะห์ความบกพร่องตลับลูกปืนฟลายวีลโดยอิงจาก WMD energy entropy และการเรียนรู้เชิงลึก 159

3-3 (a) ระบบพลังงานไฟฟ้าที่มี ระบบกักเก็บพลังงานฟลายวีล (b) กรอบงานของการเรียนรู้แบบเสริมแรง 161

3-4 แผนผังการควบคุมมอเตอร์ซิงโครนัสแม่เหล็กถาวรด้วยโครงข่ายประสาทเทียม 164

3-5 โครงร่างการสร้างแบบจำลองดิจิทัลทวินสำหรับระบบเก็บพลังงานด้วยฟลายวีล 167

3-6 โครงร่างการจัดการสภาพความสมบูรณ์และความสามารถในการทำงานระบบกักเก็บพลังงานฟลายวีลและส่วนประกอบแบบขับเคลื่อนด้วยข้อมูล 169

3-7 แผนภาพเชิงโครงร่างของ IACA 173

3-8 ภาพรวมโดยสังเขปของสถาปัตยกรรมระบบกักเก็บพลังงานฟลายวีล 176

3-9 แผนภาพบล็อกทั่วไปของการควบคุมความถี่ภาระ 181

4-1 การจำแนกระบบกู้คืนพลังงานสำหรับการประยุกต์ใช้งานยานยนต์ 219

# สารบัญรูป (ต่อ)

**รูปที่** **หน้า**


4-2 การเปรียบเทียบระบบกักเก็บพลังงานชนิดต่าง ๆ โดยพิจารณาตาม (a) ความหนาแน่นของกำลังและพลังงาน และ (b) กำลังจำเพาะและพลังงานจำเพาะ 222

4-3 การกำหนดค่าระบบที่ใช้โดยมหาวิทยาลัยไอนด์โฮเฟน 238

4-4 แนวคิดของวิทยาลัยอิมพีเรียลลอรดอน สำหรับระบบเบรกและระบบไฮบริดที่ผสานชุดส่งกำลังแบบอัตราทดแปรผันต่อเนื่อง 239

4-5 ระบบส่งกำลังไฟฟ้าไฮบริดที่มีฟลายวีลทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์กักเก็บพลังงาน 240

4-6 แผนผังระบบส่งกำลัง ETH-III สำหรับระบบส่งกำลังไฮบริดที่มีฟลายวีล 241

4-7 ส่วนประกอบของแบตเตอรี่ฟลายวีล 241

4-8 การจัดรูปแบบระบบไมโครกริดและระบบกักเก็บพลังงานฟลายวีลสามลักษณะ 256

4- 9 แผนภาพเชิงโครงร่างของการออกแบบฮับของฟลายวีลแบบต่าง ๆ 264

4-10 มุมระหว่างเวกเตอร์ความเร็วการโคจรและเวกเตอร์โมเมนตัมเชิงมุม 270

4-11 การเคลื่อนที่ของยานพาหนะและแรงบิดตอบสนองที่สอดคล้องกัน 270

4-12 แผนภาพเชิงสัญลักษณ์ของฟลายวีลหมุนสวนทางกัน 272

5-1 แผนภาพระบบกักเก็บพลังงานฟลายวีลที่เชื่อมต่อกับกริด 326

5-2 โครงสร้างระบบกักเก็บพลังงานฟลายวีลและส่วนประกอบ 328

5-3 รูปแบบการจัดเรียงต่าง ๆ ของระบบจัดเก็บพลังงานฟลายวีล 329

5-4 แสดงแผนภาพการประยุกต์ใช้ระบบกักเก็บพลังงานฟลายวีลในระบบไฟฟ้าและไมโครกริด 335

5-5 แผนภาพเชิงสัญลักษณ์แสดงข้อดีของการประยุกต์ใช้ระบบกักเก็บพลังงานฟลายวีลในหลายด้านของการคมนาคมขนส่ง 337

5-6 การประยุกต์ใช้ระบบกักเก็บพลังงานฟลายวีลสำหรับการรวมพลังงานลมพร้อมสถาปัตยกรรมสองรูปแบบที่เป็นไปได้ 339

5-7 การประยุกต์ใช้ระบบกักเก็บพลังงานฟลายวีลสำหรับการรวมพลังงานแสงอาทิตย์ 339

5-8 การใช้ระบบกักเก็บพลังงานฟลายวีลเข้ากับอุปกรณ์ระบบส่งกำลังไฟฟ้ากระแสสลับที่สามารถควบคุมได้อย่างยืดหยุ่นที่อิงกับอุปกรณ์ชดเชยกำลังรีแอกทีฟแบบซิงโครนัสสำหรับระบบจำหน่ายไฟฟ้า (DSTATCOM) 341

5-9 กลยุทธ์การควบคุมระบบกักเก็บพลังงานฟลายวีลในประเภทต่าง ๆ 345

# บทที่ 1

# เทคโนโลยีระบบกักเก็บพลังงานฟลายวีล

# (Flywheel Energy Storage System Technologies)

## 1.1 บทนำ (Introduction)

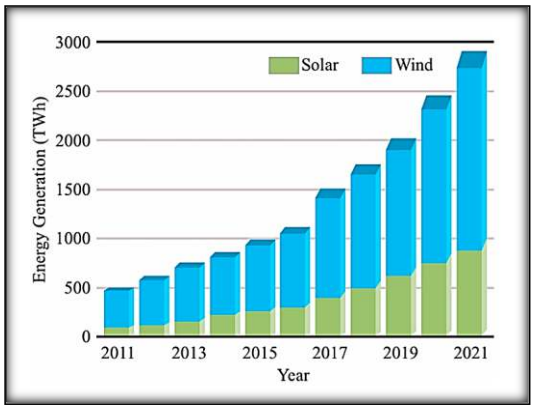
ความต้องการในการจัดการสิ่งแวดล้อมและการส่งเสริมการพัฒนาเศรษฐกิจแบบคาร์บอนต่ำได้กลายเป็นแรงผลักดันสำคัญที่นำไปสู่การเพิ่มสัดส่วนของพลังงานหมุนเวียนในระบบไฟฟ้าโลก โดยเฉพาะอย่างยิ่งพลังงานลมและพลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งได้รับความสนใจอย่างกว้างขวางในฐานะแหล่งพลังงานสะอาดและยั่งยืน ปัจจุบันทั้งสองแหล่งพลังงานนี้ได้กลายเป็นประเด็นหลักของงานวิจัยและการพัฒนาเทคโนโลยีด้านพลังงานทั่วโลก

จากมูลสถิติใน รูปที่ 1-1 พบว่าการผลิตไฟฟ้าทั่วโลกจากพลังงานลมและพลังงานแสงอาทิตย์เพิ่มขึ้นจาก 505.6 เทราวัตต์-ชั่วโมง ในปี 2011 เป็น 2,894.4 เทราวัตต์-ชั่วโมง ในปี 2021 ขณะที่มูลศักยภาพการติดตั้งกำลังผลิตใหม่ในแต่ละปีดังแสดงใน รูปที่ 1-2 พบว่า ในช่วงปี 2015–2021 ความสามารถในการติดตั้งของพลังงานทั้งสองประเภทเพิ่มขึ้นรวมกว่า 900 กิกะวัตต์ หรือคิดเป็นอัตราการเติบโตเฉลี่ยต่อปีประมาณ 18% ทั้งนี้ คาดการณ์ว่าในอีกทศวรรษข้างหน้า ความสามารถในการติดตั้งของพลังงานลมและพลังงานแสงอาทิตย์จะยังคงเติบโตต่อไปที่อัตราเฉลี่ยต่อปี 14% และ 18% ตามลำดับ (Xu et al., 2023, BP, p.l.c. 2023)

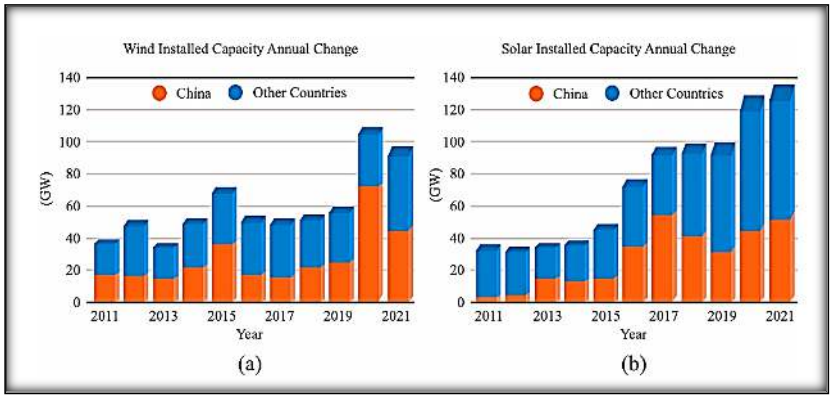
อย่างไรก็ตาม การบูรณาการแหล่งพลังงานหมุนเวียน เช่น พลังงานลมและพลังงานแสงอาทิตย์ เข้ากับระบบไฟฟ้าที่มีอยู่เดิม ยังคงเป็นความท้าทายต่อประสิทธิภาพ ความเสถียรภาพและความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้า เนื่องจากแหล่งพลังงานเหล่านี้มีลักษณะไม่มีความต่อเนื่องและมีความผันผวนสูง ทั้งจากสภาพอากาศและความไม่แน่นอนของทรัพยากรพลังงานธรรมชาติส่งผลให้จำเป็นต้องมีการจัดการสมดุลของพลังงาน การควบคุมสภาวะโหลดและการรักษาแรงดันไฟฟ้าให้คงที่ เพื่อตอบสนองต่อความท้าทายดังกล่าว ระบบกักเก็บพลังงานจึงเข้ามามีบทบาทสำคัญในฐานะเทคโนโลยีที่ช่วยเพิ่มความเสถียรและความยืดหยุ่นให้แก่ระบบไฟฟ้า ระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าทำหน้าที่แปลงพลังงานไฟฟ้าไปเป็นพลังงานในรูปแบบอื่น เพื่อให้สามารถกักเก็บไว้และนำกลับมาใช้ได้เมื่อมีความต้องการ ซึ่งช่วยลดผลกระทบจากความไม่ต่อเนื่องของแหล่งพลังงานหมุนเวียนได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Braeuer et al., 2019, Killer, et al., 2020, Hemmati et al., 2016)

ในปัจจุบันระบบระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าถูกนำไปใช้อย่างกว้างขวางในหลายภาคส่วน ไม่ว่าจะเป็นระบบขนส่งมวลชนไฟฟ้า อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แบบพกพา ระบบพลังงานแบบกระจายตัว รวมถึงโครงข่ายไฟฟ้า

อัจฉริยะ เพื่อเสริมสร้างความมั่นคงด้านพลังงานและสนับสนุนการเปลี่ยนผ่านสู่ระบบพลังงานสะอาดในอนาคต (Koot et al., 2005, Mehrjerdi 2020, Lazzeroni et al., 2019)




**รูปที่ 1-1** การเติบโตของการผลิตพลังงานลมและพลังงานแสงอาทิตย์ในทศวรรษที่ผ่านมา (Xu et al., 2023, BP, p.l.c. 2023)




**รูปที่ 1-2** กำลังการผลิตที่ติดตั้งของพลังงานลมและพลังงานแสงอาทิตย์: (a) กำลังการผลิตของพลังงานลม, (b) กำลังการผลิตของพลังงานแสงอาทิตย์ (Xu et al., 2023, BP, p.l.c. 2023)

## 1.2 ระบบกักเก็บพลังงานประเภทต่าง ๆ (Types of Energy Storage Systems)

ระบบกักเก็บพลังงาน เป็นเทคโนโลยีที่มีบทบาทสำคัญต่อการบริหารจัดการพลังงานในยุคปัจจุบัน โดยเฉพาะในระบบที่พึ่งพาพลังงานหมุนเวียน เช่น พลังงานแสงอาทิตย์และพลังงานลม ซึ่งมีความไม่แน่นอนและไม่ต่อเนื่องการผลิตไฟฟ้า ระบบกักเก็บพลังงานจึงทำหน้าที่กักเก็บพลังงานส่วนเกินไว้ในช่วงที่มีการผลิตสูง และจ่ายพลังงานคืนเข้าสู่ระบบในช่วงที่ความต้องการใช้พลังงานเพิ่มขึ้น เพื่อให้เกิดความมั่นคงและเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าโดยรวม โดยทั่วไประบบกักเก็บพลังงานสามารถแบ่งออกได้เป็นหลายประเภทตามหลักการของเทคโนโลยีที่ใช้ ได้แก่

1. การกักเก็บพลังงานเชิงกล (Behabtu et al., 2020)

2. การกักเก็บพลังงานทางเคมีไฟฟ้า (Wang et al., 2020, Wang et al., 2022, Abbas et al., 2020)

3. การกักเก็บพลังงานเคมีความร้อน (Sarbu et al., 2018, Chen et al., 2018)

4. การกักเก็บพลังงานแม่เหล็ก (Hou et al., 2017)

5. การกักเก็บพลังงานไฮโดรเจน (Alzahrani et al., 2022)

6. การกักเก็บพลังงานความร้อน (Enescu et al., 2020)

ในระบบกักเก็บพลังงานเหล่านี้ ระบบกักเก็บพลังงานเชิงกลถือเป็นระบบที่ได้รับความนิยมและใช้งานแพร่หลายมากที่สุดทั่วโลก เนื่องจากมีความยืดหยุ่นสูงในการแปลงพลังงานระหว่างพลังงานกลและพลังงานไฟฟ้า อีกทั้งยังมีความทนทานและอายุการใช้งานยาวนานเมื่อเทียบกับระบบประเภทอื่น (Boicea 2014)

Behabtu et al., (2020) ได้อธิบายถึงระบบกักเก็บพลังงานเชิงกล ที่สามารถจำแนกย่อยได้อีกหลายรูปแบบ ได้แก่

1) ระบบกักเก็บพลังงานน้ำสูบกลับ

2) ระบบกักเก็บพลังงานฟลายวีล

3) ระบบกักเก็บพลังงานจากการอัดอากาศ

4) ระบบกักเก็บพลังงานจากแรงโน้มถ่วง

ซึ่งระบบเหล่านี้มีหลักการทำงานที่แตกต่างกันไปตามรูปแบบการแปลงและการเก็บพลังงาน แต่มีเป้าหมายร่วมกัน คือการเพิ่มประสิทธิภาพในการจัดการพลังงาน เพื่อสนับสนุนการพัฒนาระบบไฟฟ้าที่มีเสถียรภาพ เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและตอบสนองต่อความต้องการพลังงานในอนาคตได้อย่างยั่งยืน

**ตารางที่ 1-1** การเปรียบเทียบวิธีการกักเก็บพลังงานหลักและคุณลักษณะสำคัญ

(Peña-Alzola et al., 2011)

| คุณลักษณะเด่น | การเปรียบเทียบวิธีการและลักษณะสำคัญของระบบกักเก็บพลังงานแต่ละประเภท | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | การกักเก็บพลังงานอากาศอัด | การกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่เคมี | การกักเก็บพลังงานแม่เหล็กยิ่งยวด | การกักเก็บพลังงานซุปเปอร์คาปาซิเตอร์ | การกักเก็บพลังงานฟลายวีล |
| ประสิทธิภาพ (%) | 40~60 | 70~80 | 80~95 | 80~95 | 85~95 |
| พลังงานจำเพาะ (วัตต์ชั่วโมงต่อกิโลกรัม) | - | 3~15 | 1~10 | 0.2~10 | 5~150 |
| กำลังจำเพาะ (วัตต์ต่อกิโลกรัม) | - | 100~700 | 1000 | 7000~18,000 | 180~1800 |

**ตารางที่ 1-1** การเปรียบเทียบวิธีการกักเก็บพลังงานหลักและคุณลักษณะสำคัญ (ต่อ)

(Peña-Alzola et al., 2011)

| คุณลักษณะเด่น | การเปรียบเทียบวิธีการและลักษณะสำคัญของระบบกักเก็บพลังงานแต่ละประเภท | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | **การกักเก็บพลังงานอากาศอัด** | **การกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่เคมี** | **การกักเก็บพลังงานแม่เหล็กยิ่งยวด** | **การกักเก็บพลังงานซุปเปอร์คาปาซิเตอร์** | **การกักเก็บพลังงานฟลายวีล** |
| ระยะเวลาในการชาร์จ | ชั่วโมง | ชั่วโมง | ชั่วโมง | นาที | นาที |
| ระยะเวลาในการคายประจุ | 1~20 ชั่วโมง | 1 นาที ~ ชั่วโมง | 1 มิลลิวินาที ~ 15 นาที | 1 วินาที ~ 1 นาที | 15 วินาที ~ 15 นาที |
| ความลึกในการคายประจุ | ความลึก | ความตื้น | ความลึก | ความลึก | ความลึก |
| เวลาตอบสนอง | นาที | มิลลิวินาที | มิลลิวินาที | มิลลิวินาที | มิลลิวินาที |
| อายุการใช้งาน (ปี) | >20 | 3-15 | >20 | >20 | >20 |
| รอบการบำรุงรักษา | เกิดบ่อย | < 6 เดือน | เกิดบ่อย | > 10 เดือน | > 10 เดือน |
| อุณหภูมิการทำงาน (องศาเซสเซียส) | 35-50 | -10~+300 | 4.2~77 k | -30~+50 | -40~+50 |
| กำหนดด้านสิ่งแวดล้อม | สูง | ปานกลาง | สูงมาก | สูง | ต่ำ |
| คุณลักษณะด้านสิ่งแวดล้อม | ไม่ก่อมลพิษ | ก่อมลพิษ | ไม่ก่อมลพิษ | ไม่ก่อมลพิษ | ไม่ก่อมลพิษ |

จากตารางที่ 1-1 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะทางเทคนิคของเทคโนโลยีการกักเก็บพลังงานที่นิยมใช้งานในปัจจุบัน โดยแต่ละเทคโนโลยีมีสมรรถนะและจุดเด่นที่แตกต่างกัน ทั้งในด้านประสิทธิภาพ พลังงานจำเพาะ กำลังจำเพาะ การสูญเสียระหว่างคายประจุ ความรวดเร็วในการตอบสนอง รวมถึงกำลังไฟฟ้าพิกัดที่รองรับได้ (Choi et al., 2017)

จากการพิจารณาในตาราง 1-1 สามารถสรุปได้ว่า ระบบกักเก็บพลังงานฟลายวีลเป็นหนึ่งในเทคโนโลยีการกักเก็บพลังงานแบบระยะสั้นที่มีกำลังสูงและมีแนวโน้มข้อดี จึงได้รับความสนใจอย่างมากในปัจจุบัน ทั้งนี้เนื่องจากมีประสิทธิภาพการแปลงพลังงานสูง มีความสามารถในการตอบสนองโหลดแบบฉับพลันได้ข้อดี สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงระยะสั้น มีค่าบำรุงรักษาต่ำและมีอายุการใช้งานยาวนานเมื่อเทียบกับเทคโนโลยีอื่นในกลุ่มเข้อดียวกัน อีกทั้งยังมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมต่ำ (Hebner et al., 2002, Vazquez et al., 2010)

อย่างไรก็ตามระบบกักเก็บพลังงานฟลายวีล ยังมีจำกัดบางประการ เช่น ระดับกำลังไฟฟ้าเฉียบพลันในบางการใช้งานยังอยู่ในเกณฑ์ต่ำกว่าเทคโนโลยีบางชนิด รวมถึงการสูญเสียพลังงานที่เกิดจากแม่เหล็กถาวรใน

มอเตอร์แม่เหล็กถาวร ซึ่งการลดทอนการสูญเสียดังกล่าวยังเป็นประเด็นท้าทายทางวิศวกรรมที่กำจัดได้ยาก (Lee et al., 2009, Lee et al., 2008, Lee et al., 2011)

ปัจจุบัน มีหลายประเทศได้ให้ความสำคัญต่อการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีระบบกักเก็บพลังงานฟลายวีล โดยเฉพาะสหรัฐอเมริกา ซึ่งเป็นผู้นำทั้งด้านการลงทุนของโครงการและความก้าวหน้าทางเทคโนโลยี ตัวอย่างระบบที่มีการใช้งานจริง เช่น

1) ระบบกักเก็บพลังงานฟลายวีล ที่มีชุดผลิตภัณฑ์เครื่องสำรองไฟ รุ่น Clean source ขนาด 250–2000 กิโลวัตต์ จากบริษัท Active Power

2) ระบบจัดการพลังงานอัจฉริยะ ขนาด 25 เมกะวัตต์ จากบริษัท Beacon Power

3) ระบบกักเก็บพลังงานฟลายวีล ขนาด 5 กิโลวัตต์-ชั่วโมง จาก Boeing Phantom Plant

4) ระบบกักเก็บพลังงานฟลายวีล ขนาด 8 กิโลวัตต์ สำหรับงานสาธารณูปโภค จาก Amber Kinetics

5) ระบบกักเก็บพลังงานฟลายวีลแบบหมุน ขนาด 315–2200 กิโลโวลต์–แอมแปร์ จากบริษัท SatCon Technology

ระบบดังกล่าวถูกประยุกต์ใช้เพื่อเสริมเสถียรภาพระบบไฟฟ้า ปรับปรุงคุณภาพพลังงานไฟฟ้าและการควบคุมกำลังไฟฟ้าสูงสุด รวมถึงการควบคุมความถี่ในระบบไฟฟ้า จากแหล่งกำเนิดพลังงานหมุนเวียนโดยเฉพาะพลังงานลมได้เป็นอย่างข้อดี (Strasik et al., 2010)

ในด้านงานวิจัยขั้นสูง ปัจจุบันมีการพัฒนาเทคโนโลยีระบบกักเก็บพลังงานฟลายวีลที่ประยุกต์ใช้ตัวนำยิ่งยวดอุณหภูมิสูง โดยมีหลายองค์กรและหน่วยงานทั่วโลกให้ความสนใจ เช่น Boeing และ Automobiltechnische Zeitschrift จากประเทศสหรัฐอเมริกาและประเทศเยอรมัน, International Superconductivity Technology Center จากประเทศญี่ปุ่น และ Korea Electric Power Corporation Research Institute จากประเทศเกาหลีใต้ เป็นต้น

## 1.3 หลักการทำงานและองค์ประกอบระบบกักเก็บพลังงานฟลายวีล (Principle of Operation and Components of the Flywheel Energy Storage System)

### 1.3.1 รูปแบบฟลายวีลระบบกักเก็บพลังงาน

ระบบกักเก็บพลังงานฟลายวีล สามารถจำแนกออกได้เป็น 2 ประเภทหลัก ดังนี้

1.3.1.1 ฟลายวีลขนาดใหญ่

ฟลายวีลประเภทนี้มักใช้ตลับลูกปืนลูกกลิ้งหรือตลับลูกปืนเลื่อนทั่วไป รองรับการหมุนที่ความเร็วรอบต่ำ แต่สามารถกักเก็บพลังงานได้ในปริมาณมาก ระบบประเภทนี้จึงเหมาะสำหรับงานที่ต้องการการจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงในช่วงเวลาสั้น ๆ รวมทั้งการลดความแหลมคมของโหลดสูงสุดในระบบไฟฟ้า

1.3.1.2 ฟลายวีลขนาดเล็กความเร็วสูง

ฟลายวีลประเภทนี้รองรับด้วยตลับลูกปืนแม่เหล็ก ทำให้เกิดโครงสร้างที่มีความกะทัดรัด สามารถหมุนได้ด้วยความเร็วสูง มีความหนาแน่นพลังงานและประสิทธิภาพที่สูงกว่า ในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมาได้มีการพัฒนาฟลายวีลประเภทนี้จากระดับพลังงานขนาดเล็กและขนาดกลางไปสู่ระดับพลังงานที่สูงขึ้น โดยเน้นที่การเพิ่มความเร็วรอบและกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่สามารถส่งมอบได้

เทคโนโลยีหลักที่ขับเคลื่อนระบบกักเก็บพลังงานฟลายวีล ประกอบด้วย

- เทคโนโลยีโรเตอร์ฟลายวีล
- เทคโนโลยีตลับลูกปืนรองรับ
- มอเตอร์-เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบบูรณาการ
- ตัวแปลงพลังงานสองทิศทาง
- การควบคุมการสั่นสะเทือนในระบบตลับลูกปืนแม่เหล็ก–โรเตอร์
- เทคโนโลยีห้องสุญญากาศ

องค์ประกอบสำคัญของระบบได้แก่

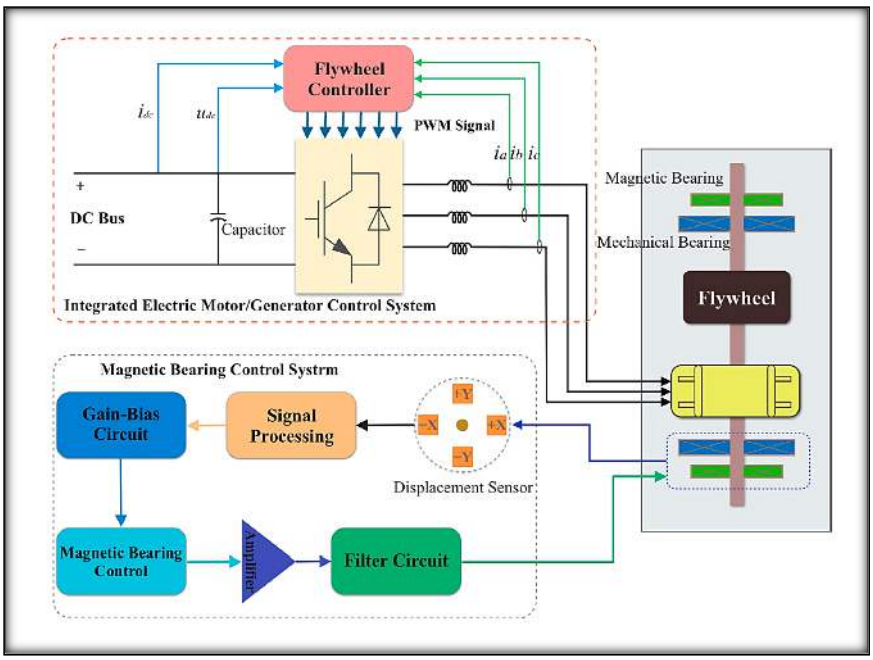
1) โรเตอร์ ซึ่งเป็นแหล่งกักเก็บพลังงานหลัก มักผลิตจากวัสดุที่มีความแข็งแรงสูงและความหนาแน่นต่ำ เช่น วัสดุคอมโพสิต เพื่อให้รองรับความเร็วรอบสูงได้อย่างปลอดภัย

2) ตลับลูกปืนรองรับเพลา มีบทบาทสำคัญในการลดแรงเสียดทานและเพิ่มประสิทธิภาพของระบบ โดยเฉพาะตลับลูกปืนแม่เหล็กและตลับลูกปืนผสม ซึ่งเป็นหัวที่ได้รับความสนใจในการวิจัยและพัฒนา

3) มอเตอร์-เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบบูรณาการมีหน้าที่สำคัญในการแปลงพลังงานสองทิศทาง กล่าวคือขณะชาร์จระบบ มอเตอร์จะทำหน้าที่เร่งฟลายวีลให้หมุนด้วยความเร็วสูงและเมื่อระบบต้องการจ่ายพลังงานฟลายวีลจะขับกลับเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อผลิตกำลังไฟฟ้าออกสู่โหลด

4) อุปกรณ์พลังงานอิเล็กทรอนิกส์กำลัง มีหน้าที่ควบคุมการไหลพลังงานเข้าและออกจากระบบ ซึ่งสามารถปรับค่าต่าง ๆ ให้สอดคล้องกับสภาวะการทำงานหรือรูปแบบการใช้งานในสถานการณ์ต่าง ๆ

5) โครงสร้างภายนอก ทำหน้าที่สำคัญสามประการ คือ (1) สร้างสภาวะแบบสุญญากาศเพื่อลดแรงต้านอากาศ (2) ปกป้องบุคลากรและอุปกรณ์ภายนอกเมื่อเกิดเหตุผิดปกติในระหว่างการหมุนและ (3) รองรับกำหนดด้านความปลอดภัยของระบบ




**รูปที่ 1-3** โครงสร้างระบบกักเก็บพลังงานฟลายวีล (Xu et al., 2023)

จากรูปที่ 1-3 แสดงโครงสร้างและความสัมพันธ์ขององค์ประกอบในระบบกักเก็บพลังงานฟลายวีลได้อย่างชัดเจน รูปภาพนี้แสดง แผนภาพบล็อกเชิงฟังก์ชั่นของระบบกักเก็บพลังงานด้วยวงล้อต้านแรงเฉื่อย (Flywheel Energy Storage System - FESS) ซึ่งประกอบด้วยสองระบบย่อยหลักในการควบคุมการทำงาน

1. ระบบควบคุมมอเตอร์/เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบบูรณาการ (Integrated Electric Motor/Generator Control System)
    - หน้าที่: ควบคุมการถ่ายเทพลังงานไฟฟ้าระหว่างบัสไฟฟ้ากระแสตรง (DC Bus) กับตัวมอเตอร์/เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ต่อกับ Flywheel
    - กระบวนการ: Flywheel Controller จะรับสัญญาณป้อนกลับของกระแส/แรงดัน DC Bus ($i_{dc}, u_{dc}$) และกระแสเฟส 3 เฟส ($i_a, i_b, i_c$) เพื่อสร้างสัญญาณ PWM (Pulse Width Modulation) ไปขับวงจรอินเวอร์เตอร์กำลัง (Power Inverter) ในการชาร์จ (ขับเคลื่อน Flywheel ให้หมุนสะสมพลังงานกล) หรือการดิสชาร์จ (ดึงพลังงานกลเปลี่ยนกลับเป็นพลังงานไฟฟ้า)
2. ระบบควบคุมตลับลูกปืนแม่เหล็ก (Magnetic Bearing Control System)
    - หน้าที่: ควบคุมตำแหน่งการลอยตัวของแกนหมุน (Rotor Shaft) ไร้สัมผัส เพื่อลดแรงเสียดทานขณะหมุนความเร็วสูง

- กระบวนการ: Displacement Sensor ตรวจจับตำแหน่งการเบี่ยงเบนของแกนหมุนตามแนวแกน $X$ และ $Y$ ส่งสัญญาณผ่าน Signal Processing และ Gain-Bias Circuit จากนั้นหน่วยควบคุม Magnetic Bearing Control จะปรับสัญญาณควบคุมและส่งผ่าน Amplifier กับ Filter Circuit เพื่อขับกระแสไฟฟ้าไปยังขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้า (Magnetic Bearing) สร้างแรงแม่เหล็กยึดแกนหมุนให้อยู่ในตำแหน่งศูนย์กลางได้อย่างแม่นยำ

**ลักษณะการทำงานร่วมกัน**

แกนหมุน (Shaft) ที่รองรับฟลายวีล จะถูกประคองไว้ด้วย Magnetic Bearing (โดยมี Mechanical Bearing เป็นระบบสำรองความปลอดภัย) ขณะที่ระบบควบคุมมอเตอร์/เครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำหน้าที่เร่งหรือชะลอความเร็วฟลายวีล เพื่อกักเก็บและจ่ายพลังงานไฟฟ้าตามต้องการ

### 1.3.2 หลักการทำงานระบบกักเก็บพลังงานฟลายวีล

ในระบบกักเก็บพลังงานฟลายวีล พลังงานไฟฟ้าจะถูกแปลงเป็นพลังงานจลน์จากการหมุน โดยเร่งฟลายวีลให้หมุนด้วยความเร็วรอบสูง เมื่อมีความต้องการใช้พลังงาน พลังงานจลน์นี้จะถูกแปลงกลับเป็นพลังงานไฟฟ้าอีกครั้งผ่านชุดมอเตอร์–เครื่องกำเนิดไฟฟ้า พฤติกรรมการทำงานของระบบระบบกักเก็บพลังงานฟลายวีล สามารถอธิบายได้ 3 โหมดหลัก ดังนี้

1. โหมดชาร์จ (Charging mode) ในช่วงการชาร์จพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายจะถูกส่งเข้าสู่ระบบเพื่อเร่งโรเตอร์ฟลายวีล ให้หมุนด้วยความเร็วที่สูงขึ้น พลังงานไฟฟ้าจึงถูกเปลี่ยนไปเป็นพลังงานจลน์จากการหมุน เมื่อความเร็วถึงระดับที่กำหนด ระบบจะเข้าสู่สถานะคงสภาพ

2. โหมดคายประจุ (Discharging mode) เมื่อมีการเรียกใช้พลังงาน ระบบจะดึงพลังงานจลน์จากฟลายวีลผ่านเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เพื่อแปลงกลับเป็นพลังงานไฟฟ้าและจ่ายออกไปยังโหลดตามค่ากำลังไฟฟ้าและแรงดันที่ต้องการ ในขณะเข้อดียวกัน ความเร็วรอบฟลายวีลจะลดลงตามปริมาณพลังงานที่ถูกดึงออกจากระบบ โดยการควบคุมในกระบวนการนี้จะขึ้นกับอุปกรณ์แปลงพลังงานและระบบควบคุมกำลัง

3. โหมดคงสภาพ (Holding mode) เมื่อฟลายวีลหมุนอยู่ที่ความเร็วเป้าหมายและไม่ได้มีการรับพลังงานเข้าหรือจ่ายพลังงานออกระบบจะอยู่ในสถานะคงสภาพในเชิงอุดมคติ หากไม่มีการสูญเสียพลังงาน พลังงานจลน์ที่กักเก็บไว้จะยังคงอยู่ในระบบ แต่ในทางปฏิบัติจะมีการสูญเสียเล็กน้อยจากความต้านอากาศและความสูญเสียภายในระบบตลับลูกปืน

### 1.3.3 มอเตอร์สำหรับระบบกักเก็บพลังงานฟลายวีล

ระบบกักเก็บพลังงานฟลายวีล จะใช้มอเตอร์-เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบบูรณาการ ซึ่งสามารถทำหน้าที่ได้ทั้งมอเตอร์และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในตัวเข้อดียวกัน โดยจะทำงานในโหมดต่าง ๆ ตามสภาวะของระบบ จึงถือเป็นองค์ประกอบหลักในการแปลงพลังงานระหว่างพลังงานไฟฟ้าและพลังงานกลจากการหมุน

1) ในโหมดชาร์จ มอเตอร์ไฟฟ้าจะขับหมุนโรเตอร์ฟลายวีล เพื่อเพิ่มความเร็วรอบด้วยการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานจลน์จากการหมุน

2) ในโหมดคายประจุ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะทำหน้าที่แปลงพลังงานจลน์โรเตอร์กลับเป็นพลังงานไฟฟ้าและส่งกลับเข้าสู่ระบบหรือโหลดตามความต้องการ

สำหรับระบบกักเก็บพลังงานฟลายวีล มอเตอร์-เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบบูรณาการจำเป็นต้องมีสมรรถนะเฉพาะ ได้แก่

- รองรับการทำงานที่ความเร็วรอบสูง
- โครงสร้างโรเตอร์ต้องมีความแข็งแรงสูง
- มีเสถียรภาพด้านกำลังไฟฟ้าและความน่าเชื่อถือสูง
- จ่ายและรับกำลังไฟฟ้าได้ตามกำหนดในการชาร์จและคายประจุฟลายวีล
- มีการสูญเสียต่ำในช่วงความเร็วที่กว้าง มีประสิทธิภาพสูงและใช้งานได้สะดวก

โดยทั่วไป มอเตอร์หลักที่ใช้ในระบบระบบกักเก็บพลังงานฟลายวีล สามารถจำแนกได้เป็น 3 ประเภทหลัก คือ

1. มอเตอร์เหนี่ยวนำ
2. มอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์
3. มอเตอร์แม่เหล็กถาวร

จากตารางที่ 1-2 แสดงการเปรียบเทียบสมรรถนะมอเตอร์ทั้งสามประเภท เพื่อใช้ประกอบการเลือกใช้งานให้เหมาะสมกับลักษณะของระบบฟลายวีลแต่ละประเภท

**ตารางที่ 1-2** การเปรียบเทียบสมรรถนะมอเตอร์ทั้งสามประเภท (Peña-Alzola et al., 2011)

| **คุณลักษณะ** | **มอเตอร์สำหรับฟลายวีล** | | |
|---|---|---|---|
| | **มอเตอร์เหนี่ยวนำ** | **มอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์** | **มอเตอร์แม่เหล็กถาวร** |
| กำลังไฟฟ้าขาออก | สูง | ปานกลาง และต่ำ | ปานกลาง และต่ำ |
| กำลังจำเพาะ (กิโลวัตต์ต่อกิโลกรัม) | ปานกลาง (~0.7) | ปานกลาง (~0.7) | ปานกลาง (~1.2) |
| การสูญเสียในโรเตอร์ | ทองแดงและเหล็ก | การสูญเสียในเหล็ก | น้อยมาก |
| การสูญเสียจากการหมุน | สามารถกำจัดได้โดยการทำให้สนามแม่เหล็กเป็นศูนย์ | สามารถกำจัดได้โดยการยกเลิกสนามแม่เหล็ก | สนามแม่เหล็กคงที่ที่ไม่สามารถกำจัดได้ |

**ตารางที่ 1-2** การเปรียบเทียบสมรรถนะมอเตอร์ทั้งสามประเภท (Peña-Alzola et al., 2011) (ต่อ)

| คุณลักษณะ | มอเตอร์สำหรับฟลายวีล | | |
|---|---|---|---|
| | มอเตอร์เหนี่ยวนำ | มอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ | มอเตอร์แม่เหล็กถาวร |
| กำลังไฟฟ้าขาออก | สูง | ปานกลาง และต่ำ | ปานกลาง และต่ำ |
| ประสิทธิภาพ (%) | สูง (91~94) | สูง (90) | สูงมาก (95~97) |
| วิธีการควบคุมระบบ | การควบคุมเชิงเวกเตอร์ | มอเตอร์ซิงโครนัส การควบคุมเชิงเวกเตอร์ ใช้ ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล | มอเตอร์แม่เหล็กถาวรซิงโซอิด การควบคุมเชิงเวกเตอร์ มอเตอร์แม่เหล็กถาวรทราปีซอยดอล ใช้ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล |
| ขนาดต่อกำลัง (1 ต่อกิโลวัตต์) | 1.8 | 2.6 | 2.3 |
| แรงบิดสั่น | ปานกลาง | สูง | ปานกลาง |
| ความเร็วสูงสุด (รอบต่อนาที) | 900~15,000 | >15,000 | >30,000 |
| การสูญเสียแม่เหล็กถาวร | ไม่มี | ไม่มี | มี |
| ต้นทุน | ต่ำ | ต่ำ | สูง |

1.3.3.1 มอเตอร์เหนี่ยวนำสำหรับระบบกักเก็บพลังงานฟลายวีล

มอเตอร์เหนี่ยวนำมักถูกเลือกใช้ในระบบกักเก็บพลังงานฟลายวีล เนื่องจากมีได้เปรียบหลายประการ เช่น โครงสร้างเรียบง่าย แข็งแรง ทนทาน ต้นทุนคุ้มค่าและสามารถรองรับกำลังไฟฟ้าสูงได้ ข้อดีเหล่านี้ยิ่งชัดเจนขึ้นเมื่อเทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์กำลังและระบบขับมอเตอร์สมัยใหม่มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง อย่างไรก็ตามมอเตอร์เหนี่ยวนำก็มีความท้าทายบางประการ ได้แก่

1) ความซับซ้อนของการควบคุม ลักษณะความไม่เชิงเส้นและการเชื่อมต่ออย่างเข้มของมอเตอร์เหนี่ยวนำทำให้ระบบควบคุมมีความซับซ้อนและความแม่นยำในการควบคุมความเร็วอาจต่ำกว่าที่ต้องการ

2) ปัญหาความร้อน การเกิดกระแสเหนี่ยวนำในโรเตอร์อย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะที่ความเร็วสูงและทำงานเป็นเวลานาน อาจทำให้โรเตอร์ร้อนเกินไป

3) จำกัดด้านประสิทธิภาพและความเร็ว แม้มอเตอร์เหนี่ยวนำมีข้อดีหลายด้าน แต่ประสิทธิภาพโดยรวมต่ำกว่าและมีความเร็วรอบสูงสุดจำกัด

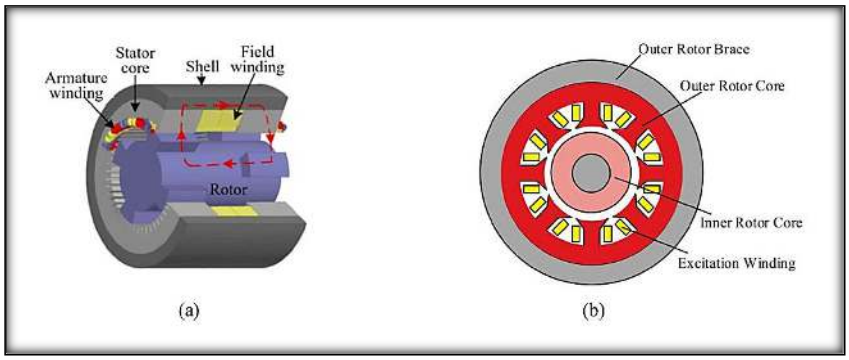
มอเตอร์เหนี่ยวนำได้รับการศึกษาอย่างกว้างขวางสำหรับการประยุกต์ใช้ในระบบกักเก็บพลังงานฟลายวีล (Yang et al., 2020, Yang et al., 2018) โดยเฉพาะมอเตอร์ซิงโครนัสรีแอ็กแตนซ์ ซึ่งเป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำรูปแบบใหม่ที่ออกแบบเฉพาะสำหรับระบบกักเก็บพลังงานฟลายวีล มีงานวิจัยจำนวนมากที่มุ่งเน้นไปที่คุณสมบัติของมอเตอร์ซิงโครนัสรีแอ็กแตนซ์โรเตอร์ภายนอกหลายหน่วย รวมถึงลักษณะทางแม่เหล็กไฟฟ้าของมอเตอร์

ซิงโครนัสรีแอ็กแตนซ์และแบบจำลองวงจรแม่เหล็กเทียบเท่าของมอเตอร์ซิงโครนัสรีแอ็กแตนซ์ (Yang et al., 2019, Ye et al., 2018, Wang et al., 2013)

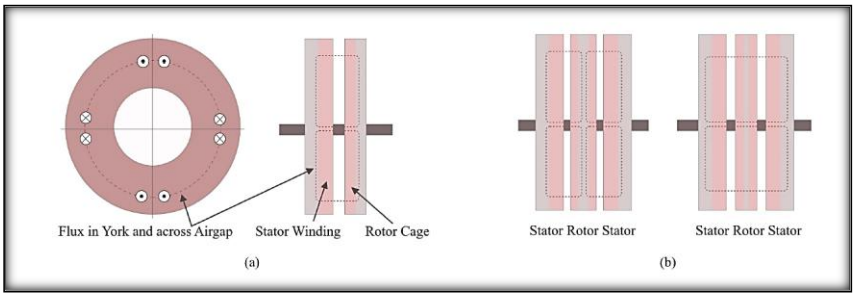
นอกจากนี้ ยังมีการศึกษามอเตอร์เหนี่ยวนำรูปแบบอื่น ๆ สำหรับระบบกักเก็บพลังงานฟลายวีล ได้แก่ มอเตอร์เหนี่ยวนำโรเตอร์คู่และมอเตอร์เหนี่ยวนำฟลักซ์เชิงแกน สำหรับระบบกักเก็บพลังงานฟลายวีล โดยการออกแบบมอเตอร์เหนี่ยวนำฟลักซ์เชิงแกนจะใช้แผ่นบางแบบหลายชั้นและโรเตอร์แข็งที่มีสเตเตอร์สองตัว ในขณะที่โรเตอร์ด้านนอกของมอเตอร์เหนี่ยวนำโรเตอร์คู่สามารถทำหน้าที่เป็นโรเตอร์ฟลายวีลได้ด้วย (Wang et al., 2019, Hong et al., 2018, Hu et al., 2018) โครงสร้างมอเตอร์เหนี่ยวนำทั่วไปเหล่านี้ แสดงไว้ในรูปที่ 1-4 และ 1- 5 (Yang et al., 2020, Sowmiya et al., 2021, Mushid et al., 2017, Wang et al., 2022)

1.3.3.2 มอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์สำหรับระบบกักเก็บพลังงานฟลายวีล

มอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ เป็นการผสมผสานระหว่างมอเตอร์รีลักแตนซ์ซิงโครนัส และเทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์กำลังสมัยใหม่ โดยมีลักษณะเด่นที่โครงสร้างขั้วคู่โดดเด่นสองขั้วและไม่มีขดลวดหรือแม่เหล็กถาวรบนโรเตอร์




**รูปที่ 1-4** โครงสร้างของ (a) มอเตอร์เหนี่ยวนำโฮโมโพลาร์ (Yang et al., 2020) และ (b) มอเตอร์เหนี่ยวนำโรเตอร์คู่ (Hu et al., 2018)




**รูปที่ 1-5** โครงสร้างมอเตอร์เหนี่ยวนำฟลักซ์แกน (a) แบบด้านเข้อดียว และ (b) แบบสองด้าน (Hu et al., 2018, Sowmiya et al., 2021, Mushid et al., 2017)

ข้อดีมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ ได้แก่

- โครงสร้างเรียบง่ายและแข็งแรง เหมาะสมกับการทำงานที่ความเร็วสูง
- ทนต่ออุณหภูมิสูง สามารถทำงานในสภาวะร้อนโดยไม่เสื่อมสภาพง่าย
- ต้นทุนการผลิตต่ำ เนื่องจากไม่ต้องใช้แม่เหล็กถาวรหรือขดลวดบนโรเตอร์
- ความน่าเชื่อถือสูงและบำรุงรักษาน้อย เหมาะสำหรับระบบที่ต้องการความต่อเนื่องในการทำงาน

อย่างไรก็ตามมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ มีจำกัดบางประการ ได้แก่

- การสั่นสะเทือนทางแรงบิดส่งผลให้การหมุนไม่สม่ำเสมอ
- การทำงานของโรเตอร์แบบขั้วยื่นอาจส่งผลให้เกิดเสียงรบกวนในระดับสูง
- ประสิทธิภาพไม่สม่ำเสมอ โดยเฉพาะในบางช่วงสภาวะภาระ
- การสูญเสียจากแรงเสียดทานของลมบนโรเตอร์ ทำให้สูญเสียพลังงานเพิ่มขึ้น

1.3.3.3 มอเตอร์แม่เหล็กถาวรสำหรับระบบกักเก็บพลังงานฟลายวีล

มอเตอร์ซิงโครนัสแม่เหล็กถาวรและมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านแม่เหล็กถาวร เป็นมอเตอร์ประเภทหลักที่ใช้ในระบบกักเก็บพลังงานฟลายวีล มอเตอร์แม่เหล็กถาวรมีได้เปรียบหลายประการ ได้แก่ ประสิทธิภาพสูง ความหนาแน่นของกำลังสูง ขนาดกะทัดรัดและเหมาะกับการทำงานที่ความเร็วสูง

อย่างไรก็ตาม มอเตอร์ประเภทนี้ก็มีจำกัด เช่น ราคาแม่เหล็กถาวรจะสูงและประสิทธิภาพมอเตอร์สามารถได้รับผลกระทบอย่างมากจากอุณหภูมิ ด้วยความก้าวหน้าของวัสดุแม่เหล็กถาวร เช่น แม่เหล็กนีโอไดเมียม (NdFeB) และแซมเมียม–โคบอลต์ (SmCo) การประยุกต์ใช้มอเตอร์แม่เหล็กถาวรจึงขยายตัวเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน ที่เป็นที่นิยมเนื่องจากควบคุมง่ายและมีประสิทธิภาพสูง อย่างไรก็ตาม เมื่อความเร็วเพิ่มสูงขึ้น ค่าความเหนี่ยวนำจะส่งผลให้รูปคลื่นกระแสของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านเบี่ยงเบนไปจากรูปคลื่นสี่เหลี่ยมในอุดมคติ และนำไปสู่การกระเพื่อมของแรงบิดที่มากขึ้น การสั่นสะเทือนของมอเตอร์เพิ่มขึ้นและประสิทธิภาพลดลง ในทางกลับกันมอเตอร์ซิงโครนัสที่ใช้แม่เหล็กถาวรติดตั้งบนโรเตอร์ เป็นที่นิยมเนื่องจากสามารถสร้างแรงบิดเรียบสม่ำเสมอ มีปัจจัยกำลังสูงและช่วยลดขนาดของอินเวอร์เตอร์

ในการวิจัยระบบกักเก็บพลังงานฟลายวีล มอเตอร์แม่เหล็กถาวรฟลักซ์เชิงแกนได้ถูกศึกษากันอย่างกว้างขวาง มีงานวิจัยที่โดดเด่นได้มุ่งเน้นการออกแบบสเตเตอร์ที่ใช้การระบายความร้อนด้วยน้ำมันร่วมกับขดลวดในแต่ละเฟสถูกพันรวมกันเป็นกลุ่มเข้อดียวและไม่ซ้อนทับกับร่องของเฟสอื่น การวิเคราะห์แรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ ด้วยวิธีองค์ประกอบไฟไนต์สามมิติการออกแบบมอเตอร์แม่เหล็กถาวรฟลักซ์ตามแนวแกน แบบความเร็วสูงมาก ตลอดจนผลกระทบของมุมเอียงของแม่เหล็กถาวรต่อแรงบิดที่เกิดจากการยึดติดแม่เหล็กกับร่องสเตเตอร์และแรงในแนวแกน (Yang et al., 2020, Su et al., 2016, Sun et al., 2015)

มีการเสนอการออกแบบนวัตกรรมสำหรับมอเตอร์ซิงโครนัสที่ใช้แม่เหล็กถาวรติดตั้งบนโรเตอร์ในระบบกักเก็บพลังงานฟลายวีลที่มีความหลากหลายรูปแบบ เช่น โรเตอร์ที่มีปลอกเฟืองแบบระบายอากาศ เพื่อยึดแม่เหล็ก

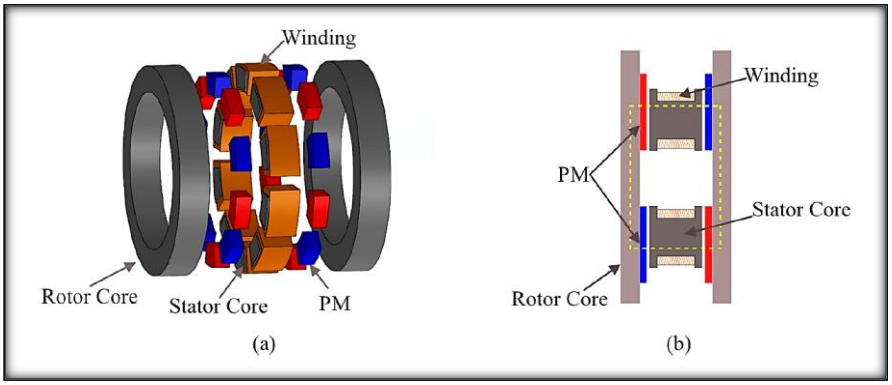
ถาวร การปรับแต่งรูปแบบด้วยการแทนลักษณะแม่เหล็กของวัสดุหรือส่วนประกอบในระบบแม่เหล็กด้วย “ความต้านทานทางแม่เหล็กเทียบเท่า” เพื่อลดการสูญเสียของโรเตอร์และมอเตอร์-เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสแม่เหล็กถาวรสองทิศทาง เพื่อลดการสูญเสียในช่วงที่ไม่ได้ใช้งาน (Zhu et al., 2017, Wang et al., 2020, Kim et al., 2015, Liu et al., 2019)

นอกจากนี้ ยังมีการศึกษามอเตอร์ซิงโครนัสแม่เหล็กถาวรที่ปราศจากตลับลูกปืนสำหรับระบบกักเก็บพลังงานฟลายวีลซึ่งรวมถึงการวิเคราะห์คุณสมบัติแม่เหล็กไฟฟ้าสถิตแบบภายในที่ปราศจากตลับลูกปืนแบบภายในที่มีแม่เหล็กถาวรเป็นรูปตัว V และการออกแบบมอเตอร์แม่เหล็กถาวรไร้เหล็กสำหรับฟลายวีลแบบลอยแม่เหล็ก (Sun et al., 2018, Anvari et al., 2018)

สำหรับมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านในระบบกักเก็บพลังงานฟลายวีล ความก้าวหน้าล่าสุดมุ่งเน้นไปที่หลายด้าน เช่น การพัฒนาและปรับแต่งโรเตอร์มอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน ภายนอกที่ไม่มีแกนเหล็ก การนำโครงสร้างแบบขนานที่ใช้หลายขดลวดเพื่อลดการสูญเสียของขดลวดและการออกแบบมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านที่รวมขดลวดวงแหวนฟลักซ์รัศมี (Lee et al., 2000, Liu et al., 2018, Liu et al., 2016)

นอกจากนี้ ยังมีการค้นพบประเภทมอเตอร์แม่เหล็กถาวรใหม่สำหรับระบบกักเก็บพลังงานฟลายวีล เช่น มอเตอร์แม่เหล็กถาวรไร้แปรงถ่านที่มีจำนวนเฟส 5 เฟส สำหรับระบบกักเก็บพลังงานฟลายวีลและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีสเตเตอร์แบบเหล็กหรือแบบกลวง (Wang et al., 2015, Sun et al., 2019)

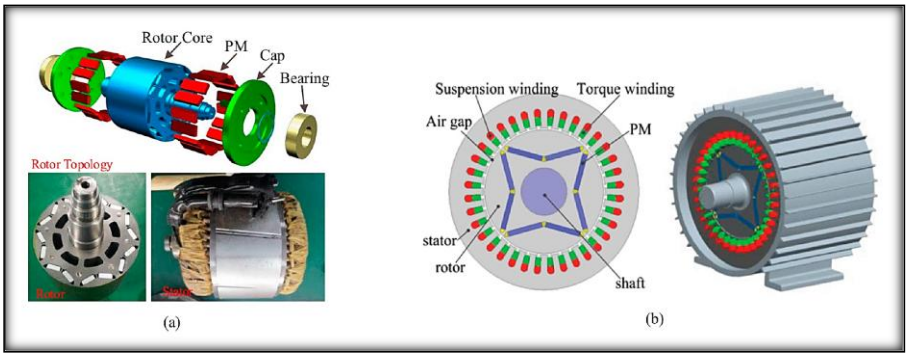
โครงสร้างมอเตอร์แม่เหล็กถาวรบางส่วน สามารถดูได้ใน รูปที่ 1-6, 1-7, 1-8 (Sun et al., 2018, Wang et al., 2017, Kelch et al., 2018, Wei et al., 2021, Lorencki et al., 2021)



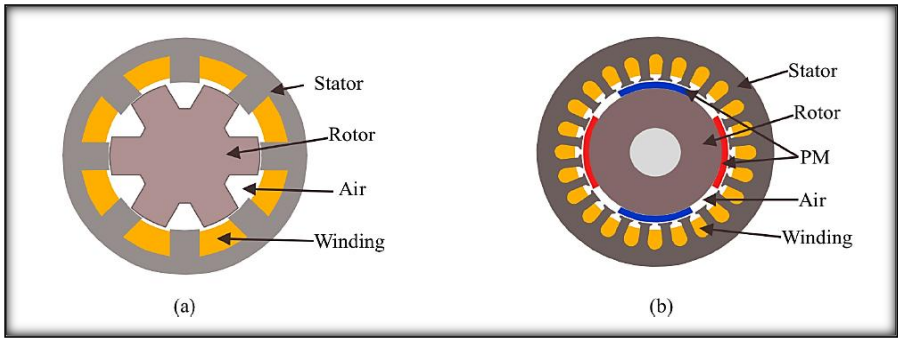

**รูปที่ 1-6** โครงสร้างมอเตอร์แม่เหล็กถาวรฟลักซ์แกน (a) มุมมองแยกชิ้นส่วน และ (b) มุมมองด้านข้าง (Wang et al., 2017)

การเลือกมอเตอร์สำหรับการประยุกต์ใช้ระบบกักเก็บพลังงานฟลายวีลตามความเร็วและกำลัง สำหรับการประยุกต์ใช้ระบบกักเก็บพลังงานฟลายวีลที่ความเร็วต่ำและกำลังสูง มอเตอร์-เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบบูรณาการ

ส่วนใหญ่จะอิงกับมอเตอร์อะซิงโครนัส เนื่องจากมีความทนทานสูง โครงสร้างเรียบง่ายและสามารถรองรับกำลังสูงได้อย่างเหมาะสม ในทางกลับกันสำหรับการใช้งานระบบกักเก็บพลังงานฟลายวีลที่ความเร็วสูง มักเลือกใช้มอเตอร์แม่เหล็กถาวรและมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ โดยมอเตอร์แม่เหล็กถาวรจะให้ประสิทธิภาพสูงและแรงบิดเรียบเนียน ขณะที่มอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ถูกใช้เฉพาะในบางกรณี เช่น สภาพแวดล้อมที่มีอุณหภูมิสูง เนื่องจากสามารถทนต่อความร้อนได้ข้อดีและบำรุงรักษาน้อย




**รูปที่ 1-7** โครงสร้าง (a) มอเตอร์ซิงโครนัสแม่เหล็กถาวร (Mansour et al., 2021) และ (b) มอเตอร์ซิงโครนัสแม่เหล็กถาวรไร้ตลับลูกปืน (Sun et al., 2018)




**รูปที่ 1-8** โครงสร้าง (a) มอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ และ (b) มอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านแม่เหล็ก (Lorencki et al., 2021)

### 1.3.4 กลยุทธ์การควบคุมสำหรับระบบกักเก็บพลังงานฟลายวีล

กลยุทธ์การควบคุมถือเป็นปัจจัยสำคัญสำหรับการทำงานที่เหมาะสมที่สุด ประสิทธิภาพสูงสุด และความน่าเชื่อถือของระบบกักเก็บพลังงานฟลายวีล กลยุทธ์เหล่านี้ครอบคลุมทั้งการควบคุม ความเร็ว แรงบิด และการจัดการพลังงานมอเตอร์ที่ใช้ในระบบ ซึ่งจะประกอบไปด้วย